

文章编号: 1001-3806(2005)01-0040-03

L N b O ₃ 光波导 F-P 腔滤波器的分析设计

符运良^{1,2},袁一方^{1*},吴英才¹,陈抱雪¹

(1. 上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093; 2 海南师范学院 物理系, 海口 571158)

摘要: 采用转移矩阵法推导出内置 L N b O ₃ 光波导的 F-P 腔滤波器的功率传输系数, 运用计算机进行模拟计算, 分析了光波导的传输损耗和腔薄膜反射率对滤波器透射光谱的强度、带宽和精细度的影响。结果表明, 传输损耗越大, 透射光谱的强度变小, 带宽越大; 反射率越大, 透射光谱的强度变小, 但带宽变小, 精细度增大。考虑了滤波器的透射光谱强度和精细度等因素, 提出一个合理的腔薄膜反射率, 优化了滤波器的设计参数。

关键词: 滤波器; L N b O ₃ 光波导; F-P 腔; 传输损耗; 精细度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Analysis and design of F-P cavity resonator filters with L N b O ₃ optical waveguides

FU Yun-liang^{1,2}, YUAN Yi-fang¹, WU Ying-cai¹, CHEN Bao-xue¹

(1. College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Physics, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

Abstract: With the transfer matrix method, the transmission coefficient of a F-P cavity filter with a L N b O ₃ optical waveguide is reasoned out. By computer simulation, the effects of structure parameters of the F-P cavity filter on the transmission light intensity, bandwidth and finess are analyzed. The results show that the transmission light intensity becomes weaker and bandwidth becomes wider with the increasing of propagation loss, and that with the increasing of reflectivity, the transmission light intensity becomes weaker and the bandwidth becomes narrower, however the finess becomes increscent. The optimizing parameters of the F-P cavity filter are given by considering the transmission light intensity and finess.

Key words: filter; L N b O ₃ optical waveguide; F-P cavity; propagation loss; fineness

引 言

F-P 腔作为一种可调谐滤波器在波分复用光通信系统中具有重要的应用^[1], 因此, F-P 腔滤波器正日益受到人们的兴趣^[2~5]。F-P 腔作为一种可调谐滤波器, 传统的情况都是通过调谐腔长, 从而选择所需的波分复用信道, 这种调谐的缺点是速度较慢。本文中是在腔内安置 L N b O ₃ 光波导, 以调谐光波导的折射率来选取波分复用信道, 这是利用了光波导快速响应的特性。笔者研究了光波导的损耗和腔介质膜的反射率对滤波器的影响, 数值分析的结果对滤波器的设计提供了重要的依据。

1 滤波器的结构

L N b O ₃ 光波导型 F-P 腔滤波器的结构如图 1 所示。光波导为由质子交换制得, 交换用的质子源为焦

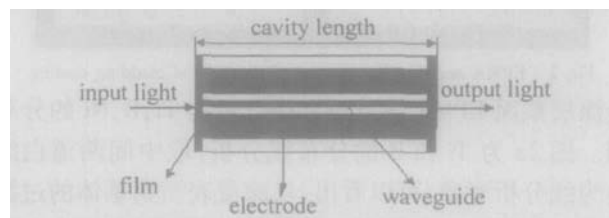


Fig 1 Schematic diagram of the tunable waveguide filter

磷酸, 可获得高质量的光波导, L N b O ₃ 晶体为 x 切 y 传, 电极由光刻制得, 为金属镉电极, 电场加在 z 方向, 以利用晶体的最大电光系数 γ_{33} 值, 光波导的两端面抛光, 用光胶粘上高反射率的介质薄膜。设两端介质薄膜的反射系数分别为 r_1, r_2 , 透射系数分别为 t_1, t_2 , 光波导的长度为 L , 传输损耗系数为 α 。为了减少光波导的泄漏损耗, 提高精细度及改善滤波器的传输系数, 以上这些值应有一个合理的设置。

基金项目: 上海市科学技术发展基金资助项目 (012261026)

作者简介: 符运良 (1964-), 男, 博士研究生, 副教授, 现从事光通信器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yuan1306@sina.com.cn

收稿日期: 2004-12-22; 收到修改稿日期: 2004-04-15

2 光波导损耗和腔薄膜反射率对滤波器特性的影响

F-P腔内为 LNbO₃ 光波导,电极加上电压,可改变波导的折射率,滤波器峰值透射波长也发生相应的变化,从而实现电压对滤波器的调谐。滤波器的结构模型如图 2 所示,电场符号上标的“+”号表示光向右传播,“-”号表示光向左传播。利用转移矩阵法^[6],得到输出与输入导模之间的关系为:

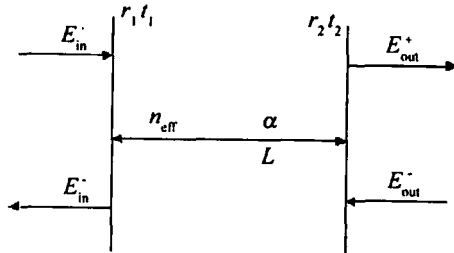


Fig 2 The model of F-P cavity filter structure

传播,“-”号表示光向左传播。利用转移矩阵法^[6],得到输出与输入导模之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} E_{in}^+ \\ E_{in}^- \end{bmatrix} = M_2 \cdot M_3 \cdot \dots \cdot M_{n-1} \cdot \begin{bmatrix} E_{out}^+ \\ E_{out}^- \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{out}^+ \\ E_{out}^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, M 为 F-P 腔滤波器的总转移矩阵。设忽略介质反射膜的吸收损耗,介质反射膜的特征矩阵为:

$$M^{(i)} = \frac{1}{t_i} \begin{bmatrix} 1 & -r_i \\ -r_i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

r_i, t_i 分别为介质反射膜的反射与透射系数,且 r_i² + t_i² = 1, i = 1, 2。对于中间的光波导部分,设导模的有效折射率为 n_{eff},其特征矩阵为:

$$M_\phi = \begin{bmatrix} \exp(-j\phi) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

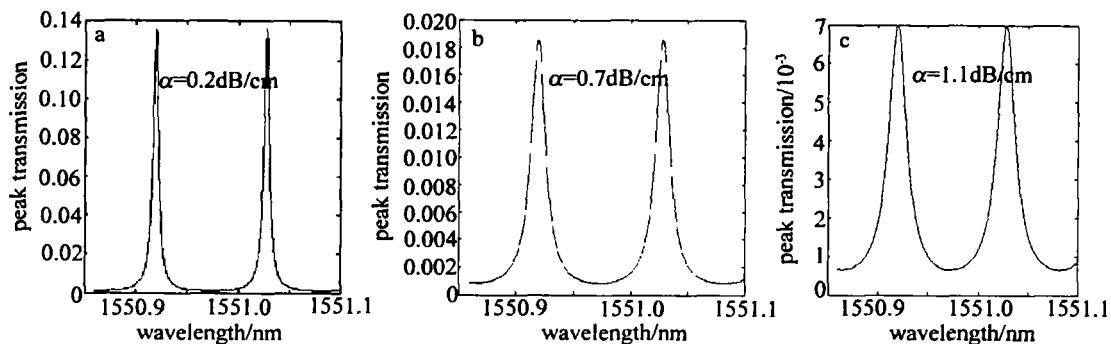


Fig 4 The peak transmission varying with wavelength in different alpha (r₁ = 0.94, r₂ = 0.98)

从图 4 和图 5 看出,光波导的损耗越大,透过曲线的半高宽也越宽,而且是成正比的关系,故应尽可能的制作高质量的光波导。而从图 5 得到,在光波导损耗一定的情况下,反射系数越大,透过曲线的半高宽越小,因此,从这一点上看,为了减少透过谱线的宽度,必须采用反射系数大的介质膜,但从前面的分析又知道,

考虑光波导的损耗, $\phi = (k_0 n_{eff} + j\alpha/2)L$, $k_0 = 2\pi/\lambda$,总的矩阵为 $M = M^{(1)} \cdot M_\phi \cdot M^{(2)}$ 。由以上关系得滤波器的透射系数为:

$$T = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 = \frac{t_1^2 t_2^2 \exp(-2\alpha L)}{(1 - r_1 r_2 e^{-\alpha L})^2 + 4 r_1 r_2 e^{-\alpha L} \sin^2 \delta} \quad (4)$$

式中, $\delta = 2\pi n_{eff} L / \lambda$ 。

滤波器的峰值透过系数为:

$$T_m = t_1^2 t_2^2 \exp(-2\alpha L) / (1 - r_1 r_2 e^{-\alpha L})^2 \quad (5)$$

设光波导的长度为 0.5cm,而且两介质膜的反射率可不同。根据(5)式,得到滤波器的峰值透过系数随光波导的损耗系数和反射系数的变化如图 3 所示。从图 3 中可容易看出,光波导的损耗越大,滤波器的峰值透过系数越小,且在 0.3dB/cm 范围内下降得较快;另一方面,反射系数越小,峰值透过系数越大。故为了提高滤波器的峰值透过系数,应制作高质量的光波导。

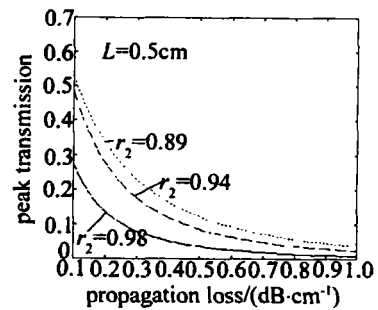


Fig 3 Peak transmission varying with propagation loss in different r₂ (r₁ = 0.94)

滤波器的半峰值宽度(以波长表示)为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{eff} L} \cdot \frac{(1 - r_1 r_2 e^{-\alpha L})}{\sqrt{r_1 r_2 e^{-\alpha L/2}}} \quad (6)$$

由(6)式知,光波导损耗及介质膜反射系数对半峰值宽度均有影响,结果如图 4 和图 5 所示。

反射系数过大,将导致峰值透过系数严重的下降,故对于反射系数的要求,必须折衷的考虑。

对于 F-P 腔滤波器,其精细度为:

$$F = \pi / (T_m + \alpha L) \quad (7)$$

式中, T_m 为峰值透过系数,由上式可见,光波导损耗和反射率对精细度都有影响,结果如图 6 所示。从图 6

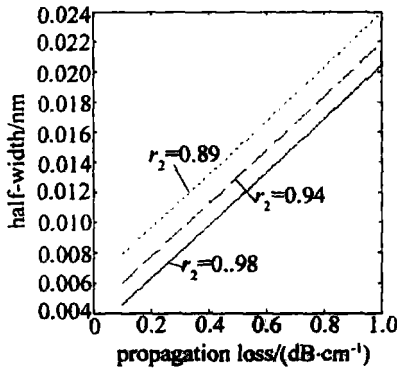


Fig 5 Half-width varying with propagation loss in different r_2 ($r_1 = 0.94$)

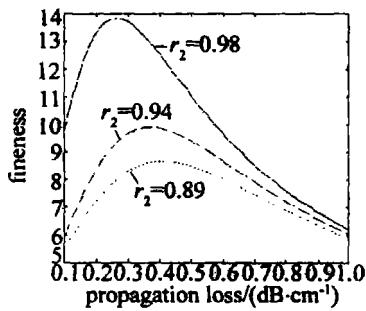


Fig 6 Fineness varying with propagation loss in different r_2 ($r_1 = 0.94$)

得出重要的特点,即当光波导的损耗起初增大时,滤波器的精细度也跟随着增加,达到最高值后,精细度随着损耗的增加而快速地减少,而且还看出,反射系数越大,滤波器的精细度也越大。

3 光波导损耗和反射率对调制作用的影响

在图 1所示的光波导滤波器结构中,电极加上电压后,光波导的折射率发生变化,折射率变化量与电压之间的关系为:

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_e^3 \epsilon_{33} \Gamma V}{G} \quad (8)$$

式中, ϵ_{33} 为晶体的电光系数, Γ 为模场积分因子, V 为电压, G 为电极间距。外加电压产生的相位延迟为:

$$\Delta \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\Delta n)L = \frac{\pi n_e^3 \epsilon_{33} \Gamma VL}{G} \quad (9)$$

当 $\Delta \delta = \pi$ 时,所加的电压称为半波电压,即 $V_\pi = G\lambda / n_e^3 \epsilon_{33} \Gamma L$,对于任意的电压,产生的相位变化为:

$$\Delta \delta = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (10)$$

由 (4)式,滤波器的透过系数变化为:

$$\Delta T = \frac{-4r_1 r_2 t_1^2 t_2^2 \exp(-3\alpha L)}{I(1 - r_1 r_2 e^{-\alpha L})^2 + 4r_1 r_2 e^{-\alpha L} \sin^2 \delta} \cdot \pi \frac{V}{V_\pi} \cdot \sin 2\delta \quad (11)$$

对于单位调制电压,由 (10)式,得到滤波器的透过系数变化与光波导损耗和反射率之间的关系曲线,如图 7和图 8所示。由图 7可知,光波导的传输损耗越大,峰值透过系数变化越小,即,调制的灵敏度越低;而从图 8可知,反射系数越大,峰值透过系数变化越小。

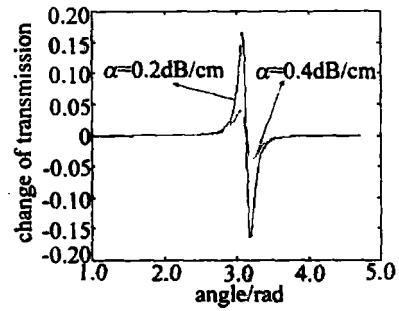


Fig 7 Change of transmission varying with angle in different α ($r_1 = 0.94$, $r_2 = 0.98$)

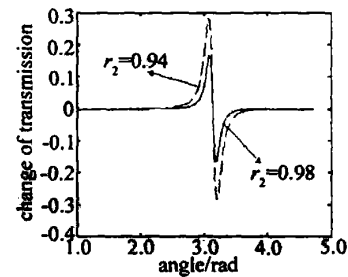


Fig 8 Change of transmission varying with angle in different r_2 ($r_1 = 0.94$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/cm}$)

4 滤波器的设计

当光波导的长度越大时,光波导的光损耗也越大,这将会导致滤出光的光强大幅度减少,不利于光通信的接收,因此, LNbO_3 光波导的长度越短越好,但由于过短会给晶片加工造成困难,故在本设计中,光波导的长度为 $L = 5.275 \text{ mm}$ 。光波导由质子交换制得,用焦磷酸做为质子源,可制得高质量的光波导,其损耗系数可达 0.35 dB/cm 。光波导的宽度为 $8 \mu\text{m}$,以便与单模光纤联接,提高耦合效率。两电极的间距为 $4 \mu\text{m}$,电极的宽度比间距大得多,为 $1000 \mu\text{m}$,电极长度与光波导的长度相同。光波导的折射率在加电压前,测得为 2.0274 。另一方面,从图 5和图 6可看出, F-P腔的反射系数越大,滤波器的透射光谱的半高宽越窄,从而导致精细度越高,在自由光谱范围内,容纳的密集波分信道的个数就越多,但反射系数过大,会导致透射光谱的光强大幅度下降,且调制的灵敏度低,故反射系数也不能太大,取 $r_1 = r_2 = 0.95$ 。根据 ITU-T建议的国际标准密集波分复用信道间隔及标称中心频率,中心频率为 193.1 THz ,其对应的中心波长为 1552.5 nm ,由 (6)式计算出滤波器的半高宽为 0.0095 nm ,以波长为单位的滤波器的自由光谱范围为 $S = \lambda^2 / 2nL = 0.104 \text{ nm}$,由此得滤波器的精细度计算为 11。模场积分因子 $\Gamma = 0.5$,由以上给出的参数,可计算出滤波器的半波电压 $V_\pi = 7.06 \text{ V}$ 。当电极电压改变时,根据 LNbO_3 晶体的电光特性,光波导的折射率发生改变,从而使透过滤波器的信道频率改变,这样便可实现了调

(下转第 65 页)

4 实验结果分析

(1)在接收机上观察到的反射光信号功率可表示为: $P_s = P_0 \cdot f(\tau_a, \tau_r, A_r, A_s, \rho_s, \theta_0, \theta_s, R) \cdot \cos\theta$, 式中, P_s 为接收机探测到的功率, P_0 为发射功率, τ_a, τ_r 分别为大气双程透过率、接收光学系统透过率, A_r, A_s 分别为有效接收面积、“猫眼”有效面积, θ_0, θ_s 分别为发射激光束、回波激光束发散角, 反射系数为 ρ , 目标距离为 R 。

对某一具体目标而言, 在正对的情况下: $\cos\theta = 1$, 为 P_s 最大值, 此时亮环或亮斑最亮。在实验中目标左右移动相当于 θ 偏离中心变化, θ 变大时, P_s 变小。当 P_s 小于 CCD 的最小探测阈值时, 则观察不到亮环或亮斑。

观察到的亮斑或亮环是探测方激光能量、目标光学系统的视场、两系统光轴水平和竖直夹角等的函数。

(2)由于红光是 1mW 的连续光, 而测距机发出的是频率为 20Hz 作用时间为 10ns 的脉冲光, 在相等观察时间内前者能量是后者的 10^3 多倍, 故在监视器上的得到的反射光图像亮度前者比后者亮得多。

(3)瞄准激光器探测到光学成像系统时可观察到

亮环; 当二者基本同轴时, 光学系统镜片越多亮环数越多, 并可见多次来回反射的亮环。这说明不能简单地把回波看作一个等效光源, 而应该看作在不同方向上的多个光源的共同效应, 这与前面的分析理论一致, 并且在其它文章中未见到类似报道。

5 结论

通过实验的方法记录到了关于“猫眼”效应的返回光波图像。在验证一般理论分析的基础上, 详细分析论证了产生“猫眼”效应光学系统中各个光学元件系统由于非同轴性对回波能量的不同权重影响, 并给出了回波光源理论模型的简要分析表达式。文中的分析讨论对于“猫眼”效应的进一步研究和应用提供了可靠的实验依据。

参考文献

- [1] 卿光弼, 王学楷, 郭勇 *et al* “猫眼”效应的物理模型及证明 [J]. 激光技术, 1995, 19(4): 244~247.
- [2] 邹继伟, 童忠诚, 孙晓泉. 光学窗口的激光雷达截面 [A]. 全国光电技术学术交流会议论文集 [C]. 天津: 中国航天机电集团第三研究所 8358 研究所, 2000. 334~336.
- [3] 赵勋杰, 高稚允, 张英远 *et al* 基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用 [J]. 光学技术, 2003, 29(7): 415~417.

参考文献

- [1] SALEH M A A, STONE J. Two-stage Fabry-Perot filters as demultiplexers in optical FDMA LAN's [J]. J Lightwave Technol, 1989, 7(2): 323~330.
- [2] VSL E C, WU M, LIG S. GaAs micromachined widely tunable Fabry-Perot filters [J]. Electron Lett, 1995, 31(3): 228~230.
- [3] HUANG Sh H, XIE Sh Zh, ZHOU B K *et al* Crosstalk of WDM optical communication systems using Fabry-Perot demodulators [J]. J Opt Commun, 1994, 3(15): 101~103.
- [4] 吴正茂, 夏光琼, 陈建国 *et al* 光脉冲通过 F-P 滤波器后峰值功率的变化 [J]. 激光技术, 2002, 26(1): 33~34.
- [5] ZHANG R K, YANG X H, ZHOU Zh *et al* Micromechanical tunable optical filter [J]. 半导体学报, 2003, 24(4): 347~350.
- [6] VONSOV C IA, OROBTCHOUK R, KOSTER A. Numerical simulation of a silicon-on-insulator waveguide Fabry-Perot interferometer for intensity light modulators at 1.3 μm [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(11): 2124~2129.

(上接第 42 页)

谐选择密集波分复用信号的功能。一般情况下, 是采用两个滤波器相级联, 在半波电压范围内, 可用于信道间隔为 50GHz 的 8 信道的密集波分复用的解复用滤波, 关于这一点, 这里不再论述。

5 结论

通过以上的分析可知, 光波导的损耗大, 滤波器的峰值透过系数变小, 透过谱线变宽, 半高宽变大, 调制灵敏度变低; 而在光波导的损耗一定时, 介质膜的反射率越大, 则使峰值透过系数变小, 半高宽变小, 滤波器的精细度增加, 而且在某个损耗值时, 精细度达到最大值, 但调制灵敏度变低。以上这些研究结果对解波分复用滤波器的设计具有重要的实际指导意义。